

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra měřicí a řídicí techniky

Řídicí systém mobilního robota
Control System of a Mobile Robot

Prohlášení

„Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

Datum odevzdání: 6. 5. 2011

.....

Martin Latocha

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Jiřímu Kotzianovi, Ph.D. za konzultace, cenné rady a připomínky spojené s vypracováním této práce.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce pojednává o realizaci nového řídicího systému s nabíjením baterií pro aplikaci fotbalových robotů jak pro výuku, tak pro soutěž robotů dle pravidel MiroSot. Práce se zabývá novým systémem řízení motorů a návrhem nové řídicí desky s možností připojení různých modulů bezdrátové komunikace a správy napájení. Rovněž je zde řešen návrh integrovaného nabíjecího a balancovacího systému pro baterie typu Li-Pol.

KLÍČOVÁ SLOVA

Akumulátor, sekundární článek, nabíjení Li-Pol článků, měření proudu, měření rozdílového napětí, řídicí systém, nabíjecí systém, správa napájení.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with implementation of new control system with battery charger for robot soccer application for education and robot competition by MiroSot rules. Thesis deals with new motor control system and design of new control board with connection of different wireless modules and power management modules. Thesis also deals with design of integrated charger and balancer system for Li-Pol batteries.

KEY WORDS

Accumulator, secondary cell, Li-Pol cell charging, current measure, measure of differential voltage, control system, charging system, power management.

Seznam použitých symbolů a zkratek

<i>A</i>	zesílení (-)
<i>A/D</i>	analogově/digitální
<i>bps</i>	bitů za sekundu (bits per second)
<i>C</i>	elektrická kapacita (F), kapacita akumulátoru (Ah)
<i>CCCV</i>	metoda nabíjení konstantní proud konstantní napětí (constant current constant voltage)
<i>CMOS</i>	technologie doplňující se kov-oxid-polovodič (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor)
<i>DPS</i>	deska plošného spoje
<i>DSC</i>	digitální signální kontrolér
<i>ESR</i>	ekvivalentní sériový odpor (equivalent series resistance) (Ω)
<i>f</i>	frekvence (Hz)
<i>FIRA</i>	federace mezinárodní asociace fotbalu robotů (Federation of International Robot-soccer Association)
<i>FLASH</i>	nevolatilní elektricky programovatelná paměť s libovolným přístupem
<i>GAIN</i>	zisk (-)
<i>GFSK</i>	Gaussovská modulace (Gaussian frequency-shift keying)
<i>I</i>	elektrický proud (A)
<i>JTAG/EOnCE</i>	standard programování FLASH paměti (Joint Test Action Group/Enhanced On-Chip Emulation)
<i>L</i>	indukčnost (H)
<i>LED</i>	svítivá dioda (light emitting diode)
<i>LiFePO₄</i>	lithium-železo-fosfátový
<i>Li-Ion</i>	lithium-iontový akumulátor
<i>Li-Pol</i>	lithium-polymerový akumulátor
<i>MiroSot</i>	turnaj ve fotbal mikro robotů (Micro Robot Soccer Tournament)
<i>MOSFET</i>	polem řízený tranzistor se strukturou kov-oxid-polovodič (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
<i>NiCd</i>	nikl-kadmiový akumulátor
<i>NiMH</i>	nikl-metal hydridový akumulátor
<i>P</i>	výkon (W)
<i>Pb</i>	chemická značka olova
<i>PWM</i>	pulsní šířková modulace (pulse width modulation)
<i>PSD</i>	proporcionálně sumačně diferenční regulace
<i>R</i>	elektrický odpor (Ω)
<i>RAM</i>	paměť pro čtení a zápis (Read Access Memory)
<i>SMD</i>	součástka pro povrchovou montáž (surface mount device)
<i>SOT-23</i>	SMD pouzdro
<i>SPI</i>	sériové periferní rozhraní (Serial Peripheral Interface)

T	perioda (s)
TTL	tranzistorově-tranzistorová logika (transistor-transistor-logic)
δ	činitel plnění impulsu (-)

Obsah

1	Úvod	1
2	Zdroje energie pro mobilní roboty	2
2.1	Akumulátory	2
2.2	Nabíjení lithium-polymerového akumulátoru	3
2.3	Balancování článků	4
3	Návrh řešení	5
3.1	Řídicí část	5
3.1.1	Návrh měření proudu do motorů	5
3.1.2	Návrh měření napětí článků	6
3.2	Správa napájení	7
3.2.1	Návrh akumulačního step-down měniče	7
3.2.2	Návrh měření nabíjecího proudu	9
3.3	Systém pro návrh schémat a plošných spojů Formica	9
4	Realizace	10
4.1	Řídicí část	10
4.2	Popis čipu nRF24L01	12
4.3	Požadavky pro výběr digitálního signálního kontroléru	13
4.4	Popis mikrokontroleru 56F8037	13
4.5	Nabíjecí část	15
4.6	Návrh desky plošného spoje	16
4.7	Umístění do robota	17

5	Firmware.....	18
5.1	Processor Expert	18
5.2	Popis firmware	18
5.2.1	Komunikace s nadřazeným systémem.....	18
5.2.2	Regulace motorů.....	19
5.2.3	Nabíjecí systém	19
6	Testování.....	21
6.1	Hardware robota.....	21
6.1.1	Měření rozdílových zesilovačů.....	21
6.1.2	Měření AD8211	22
6.2	Řídicí systém.....	23
6.3	Nabíjecí systém	23
6.4	Shrnutí testování	24
7	Závěr	25
8	Použitá literatura.....	26
9	Seznam příloh	28

1 Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací nového řídicího systému pro aplikaci fotbal robotů dle pravidel MiroSot od mezinárodní organizace FIRA. Předmětem této práce je rovněž nalezení nového akumulátoru pro napájení robota napětím vyšším, než je stávající a správa napájení tohoto akumulátoru (viz. kapitola 2).

Je zde navržen a odzkoušen nový způsob napájení robota tak, aby se uměl sám vypnout, popřípadě vypnout některé své periferie. Dále je navržen efektivní systém měření napětí na člancích, měření proudu do motorů a v neposlední řadě měření nabíjecího proudu a celé nabíjecí části. (viz kapitola 3).

Práce obsahuje rovněž výběr nového digitálního signálového mikrokontroleru pro řízení systému. Dále obsahuje návrh nové desky plošného spoje pro řízení robota a nabíjení a správu jeho napájení tak, aby ji bylo možno integrovat jak do stávajících robotů, tak do konstrukce, o jejíž koupi se v současnosti uvažuje a je navržen způsob umístění do stávající konstrukce robota (viz kapitola 4).

Dále je v této práci popsáno nabíjení vybrané baterie a způsob integrování do systému v podobě algoritmu pro řídicí kontrolér spolu s původními algoritmy pro řízení celého robota (viz kapitola 5).

Práce je zakončena testováním celého systému k zajištění správné funkčnosti hardwaru a otestování měřicích systémů pro případnou kalibraci v DSC. Testován je rovněž navržený nabíjecí systém (viz kapitola 6).

2 Zdroje energie pro mobilní roboty

Jako hlavní zdroj pro napájení robotů se využívá převážně akumulátorů, tedy sekundárních článků. Ty se nejprve musí před použitím nabít, až poté z nich lze odebírat energii, na rozdíl od článků primárních. V následující kapitole budou popsány vybrané typy akumulátorů a nabíjení vybraného akumulátoru pro použití v robotu. [1]

2.1 Akumulátory

Sekundární články se dělí především podle principu, a to na tyto nejčastěji používané typy: olověný (Pb), nikl-kadmiový (NiCd), nikl-metal hydridový (NiMH), lithium-iontový (Li-Ion), lithium-železo-fosfátový (LiFePO₄) a lithium-polymerový akumulátor (Li-Pol). [1]

Olověné akumulátory jsou nejpoužívanějším typem sekundárních článků o kapacitách řádově od 1Ah do 10000Ah. Výhodou je nízká cena, velké vybíjecí proudy a dlouhá životnost. Jmenovité napětí jednoho článku je 2V a skladují se v nabitěm stavu. Nevýhodou jsou velké rozměry a značná hmotnost. [2]

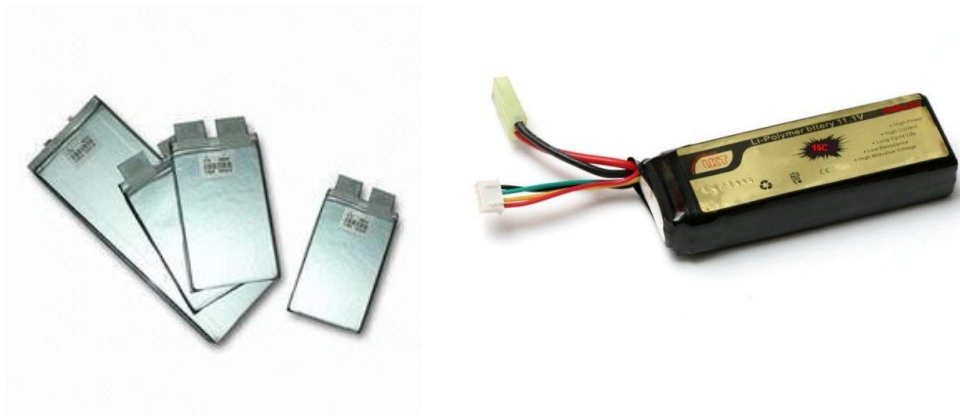
Nikl-kadmiový akumulátor je výhodný v aplikacích, kde je potřeba velkých vybíjecích proudů, řádově desítky ampér. Jeho hlavní výhodou je odolnost vůči hlubokému vybití. Jmenovité napětí jednoho článku je 1,2V. Při používání článku dochází k znehodnocování elektrolytu a tím snižování kapacity a zvyšování vnitřního odporu. [3]

Nikl-metal hydridový akumulátor patří dnes k nejpoužívanějším článkům, který má oproti nikl-kadmiovému akumulátoru přibližně dvojnásobnou kapacitu a je levnější. Jmenovité napětí jednoho článku je 1,2 V a často se používá k náhradě primárních článků. Nevýhodou je vysoké samovybíjení, které se pohybuje okolo 15 – 30 % za měsíc. [4]

Lithium-iontový akumulátor je běžně používán ve spotřební elektronice, určené k častému nabíjení a díky malým rozměrům je převážně používán pro přenosná zařízení. Jmenovité napětí jednoho článku je 3,7V. Akumulátor netrpí paměťovým efektem, není jej třeba formovat (několikrát nabíjet a vybit před prvním použitím) a má velmi malou hodnotu samovybíjení - do 5%. Nevýhodou je stárnutí, které se zvyšuje s teplotou okolí a výší nabíjecího proudu a nevydrží úplné vybití. Při špatném zacházení hrozí nebezpečí výbuchu. Principem se velmi podobá lithium-polymerové baterii. [5]

Lithium-železo-fosfátový akumulátor je druh lithium-iontového akumulátoru, který používá jiný katodový materiál. Pracovní napětí jednoho článku se pohybuje v rozmezí 3,0V až 3,3V. Článek je schopen dodávat vyšší proud oproti jiným lithiovým akumulátorům. Další výhodou oproti ostatním lithiovým akumulátorům je, že při extrémních podmínkách neexploduje. Samovybíjení u tohoto článku prakticky neexistuje a netrpí paměťovým efektem. [6]

Lithium-polymerový akumulátor se používá především pro pohony modelů a to díky malým rozměrům a tvaru, který je zpravidla plochý. Jmenovité napětí jednoho článku je 3,6V a nesmí být v žádném případě překročeno 4,2V při nabíjení a nesmí poklesnout pod 3V při provozu baterie. Stejně jako u lithium-iontového akumulátoru může dojít k explozi. [7]



Obr. 1 – Li-Pol články (vlevo) a Li-Pol akupack (vpravo)

Z důvodu malých rozměrů a tvaru byl k napájení robota vybrán právě lithium-polymerový akumulátor. V následující podkapitole je vysvětleno nabíjení tohoto akumulátoru.

2.2 Nabíjení lithium-polymerového akumulátoru

U tohoto typu akumulátoru je třeba dbát na specifikace výrobce. Při překročení stanovených parametrů může dojít k nárůstu teploty, což má za následek vznik nezastavitelné chemické reakce, která může způsobit až explozi akumulátoru. Proto je nutno používat speciální, pro tento akumulátor určené nabíječky.

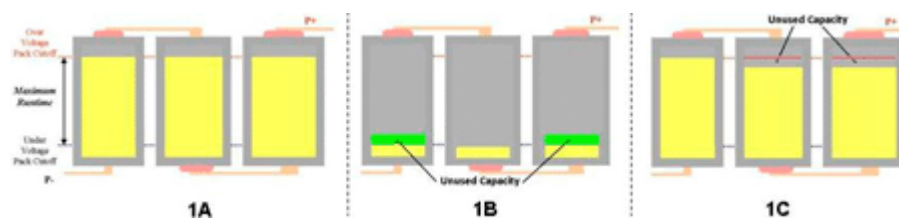
Nabíjecí napětí nesmí překročit povolené maximální napětí na článek, což u většiny akumulátorů bývá 4,2V a nabíjecí proud by se měl pohybovat v bezpečném rozmezí 0,7C až 1C. Někteří výrobci dovolují až šestinásobek kapacity.

Nejčastěji se lithiové akumulátory nabíjejí konstantním proudem (je-li napětí článku větší, než 3V), kterým se nabíjí až do hodnoty napětí 4,2V, což je přibližně 90% kapacity. Poté se nabíjí konstantním napětím až do poklesu proudu na hranici 2 – 3% počátečního nabíjecího proudu. Tato metoda se nazývá CCCV.

Pokud je napětí článku v rozmezí 2,5V – 3V, je možno jej nabíjet malým konstantním proudem o velikosti přibližně desetiny kapacity článku. Pod hranici 2,5V je článek považován za zničený a jeho nabíjení se nedoporučuje. [7], [8]

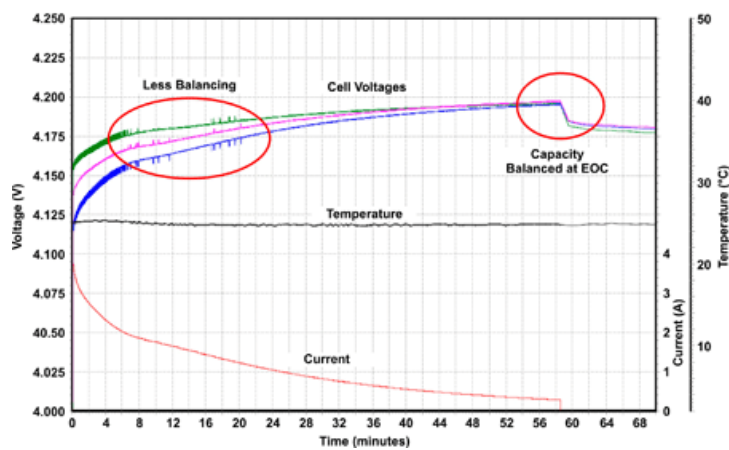
2.3 Balancování článků

Každý článek v baterii má jiný vnitřní odpor, což má při nabíjení (i vybíjení) nežádoucí efekt v podobě jiných nabíjecích (vybíjecích) proudů a články tedy nejsou nabity na stejnou kapacitu, viz obr. 2. Nabíjení baterie, jejíž články mají napětí různé i o 100mV, snižuje její životnost. Proto je třeba při nabíjení použít balancování článků, což je proces hlídající napětí všech článků. Tento upravuje jejich nabíjecí proud tak, aby na konci nabíjení měly všechny články relativně stejná napětí. Jejich rozdíl by se měl pohybovat v rozmezí 0,01V - 0,03V. Takto se všechny nabijí korektně do plné kapacity. [9], [10]



Obr. 2 – rozdíl v nabití článků [9]

Na obr. 2 je vyobrazena úroveň nabití třech článků. V levé části jsou všechny články nabity na stejnou úroveň. Ve střední části obrázku jsou články vybity, mají již ovšem jinou úroveň. Stav po nabíjení je na pravé části obrázku, kdy levý článek je plně nabit, kdežto další dva nabity nejsou. Na následujícím obrázku se nachází graf, ukazující napětí článků při nabíjení a balancování. [9]



Obr. 3 – graf nabíjení a balancování článků [9]

Dražší nabíječky lithiových baterií mívají obvody pro balancování již obsaženy v sobě. Pokud nabíječka takový obvod nemá, je nutno použít externích balancerů. Balancovat není nutno při každém nabíjení. Mělo by se ovšem provádět alespoň při každém desátém. [10]

3 Návrh řešení

3.1 Řídicí část

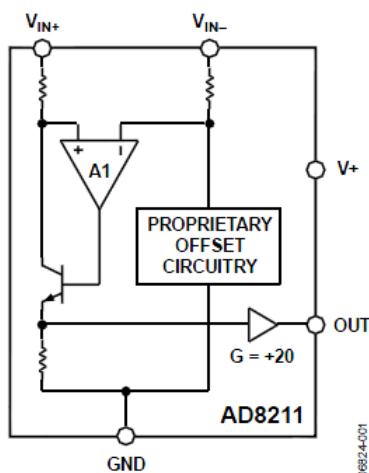
Řídicí část bude obsahovat DSC pro řízení celého robota, ovládání jeho pohonu a komunikace s nadřazeným řídicím systémem. Tato část bude rovněž obsahovat měření velikosti napětí na člancích.

Pro řízení motorů budou použity jiné H-můstky, než ve stávajících robotech, kde se nacházejí MX33887 firmy Freescale. Ty mohou být řízeny PWM o maximální frekvenci 10kHz, přičemž požadavek pro efektivnější řízení je frekvence 30kHz. Tento splňují můstky TLE5206-2, které budou blíže specifikovány v kapitole 4.1. Ty ovšem neobsahují obvody pro měření proudu. [11]

3.1.1 Návrh měření proudu do motorů

Pro měření proudu lze využít několik způsobů. Jako první se nabízí měření na odporu. Nevýhodou tohoto způsobu je vznik úbytku napětí na měřicím odporu, a tedy jeho tepelné namáhání. Dalším problémem je úprava napětí pro měření kontrolérem. Použití děličů napětí nepřipadá v úvahu, a to kvůli zabránění dvou vstupů A/D převodníku. Nakonec byl vybrán integrovaný obvod AD8211 firmy Maxim, a to kvůli jeho dostupnosti, velikosti a ceně.

Tento integrovaný obvod je v pouzdře SOT-23 s pěti piny. Obsahuje zesilovač napětí mezi vstupními měřicími piny a vyznačuje se hodnotou zesílení 20 s chybou zesílení $\pm 0,5\%$. Pracuje s napětími od -2V až po 65V a je nutno jej napájet 5V. Následuje návrh měřicího rezistoru. [12]



Obr. 4 – blokové schéma obvodu AD8211 [12]

Známa fakta:

Maximální proud do motorů cca 3A, obvod AD8211 má zesílení 20, maximální měřitelné napětí je 3,3V.

Maximální použitelná hodnota odporu:

$$R_{MAX} = \frac{U_{MAX}}{GAIN \cdot I_{MAX}} = \frac{3,3}{20 \cdot 3} = 0,055\Omega \quad (1)$$

Maximální výkonové zatížení:

$$P_{MAX} = I_{MAX}^2 \cdot R = 3^2 \cdot 0,05 = 450mW \quad (2)$$

Kvůli dostupnosti budou použity dva rezistory hodnoty $0,1\Omega$ velikosti 1206 zapojeny paralelně. Toto pouzdro se vyznačuje maximální výkonovou ztrátou 250mW.

3.1.2 Návrh měření napětí článků

Měření napětí článků bude provedeno pomocí rozdílových zesilovačů, vytvořených z operačních zesilovačů. Vzhledem k tomu, že napětí na nabitém článku dosahuje 4,3V a na vstup DSC může být přivedeno pouze napětí maximální hodnoty 4V, v základním zapojení jen 3,3V, přičemž je nutno počítat s malou rezervou, zesílení rozdílového zesilovače musí být menší než jedna.

Návrh zesílení:

$$A_{MAX} = \frac{U_o}{U_I} = \frac{3}{4,3} = 0,698 \quad (3)$$

Návrh operační sítě při $R_1 = 120k\Omega$:

$$R'_2 = A \cdot R_1 = 0,698 \cdot 120 \cdot 10^3 = 83,76 \cdot 10^3\Omega \quad (4)$$

Použity tedy budou rezistory 120k Ω a 82k Ω . Následuje výpočet konečného výstupního napětí zesilovačů při napětí článku $U_I = 4,3V$.

$$U_o = \frac{R_2}{R_1} \cdot U_I = \frac{82 \cdot 10^3}{120 \cdot 10^3} \cdot 4,3 = 2,938V \quad (5)$$

3.2 Správa napájení

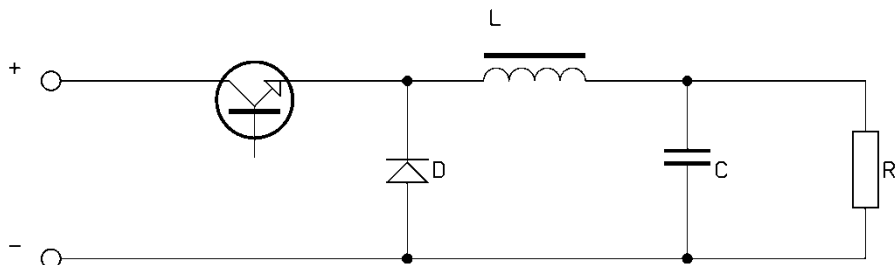
Správa napájení bude obsahovat nabíjecí obvod, balancery pro korektní nabití všech článků na stejné napětí, obvod pro měření nabíjecího proudu a obvod pro měření napětí článků.

Nabíjecí obvod je z hlediska bezpečnosti nejkritičtější. Při jeho špatném návrhu a nekorektní činnosti by mohlo dojít nejen ke zničení baterií, ale také k jejich explozi, což by mohlo mít za následek požár. Proto musí být kladen důraz na efektivní způsob nastavení hodnoty nabíjecího proudu a na jeho sledování.

K nastavení nabíjecího napětí (a tím i proudu) řídicím kontrolérem je nejefektivnější akumulární měnič se snižujícím napětím, tzv. step-down, kdy je výstupní napětí nastavováno PWM signálem z kontroléru.

3.2.1 Návrh akumulárního step-down měniče

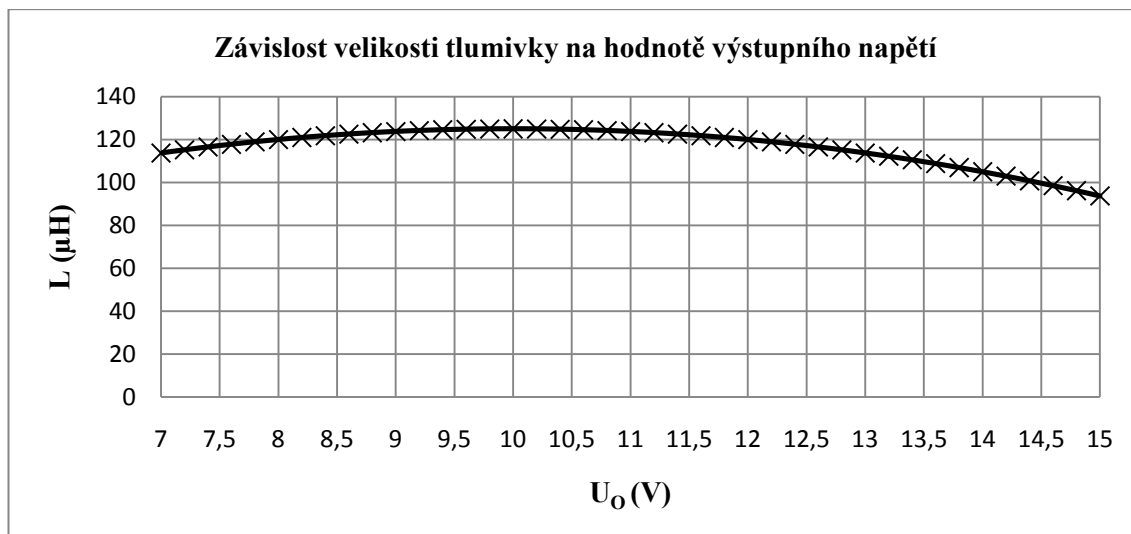
Akumulární měniče akumulují energii buď v magnetickém poli tlumivky nebo elektrickém poli kondenzátoru a odtud se spínačem převádí na elektrický výkon příslušné velikosti pro zátěž. Akumulární měniče jsou pro svou jednoduchost a snadnou regulovatelnost nejpoužívanější v oblasti spínaných měničů. Na obr. 5 je základní schéma akumulárního měniče typu step-down. [13]



Obr. 5 – akumulární měnič typu step-down [13]

Návrh tlumivky:

$$L = \frac{(U_{1\text{MAX}} - U_0) \cdot \delta}{\Delta I_L \cdot f} = \frac{(U_{1\text{MAX}} - U_0) \cdot \frac{U_0}{U_{1\text{MAX}}}}{\Delta I_L \cdot f} = \frac{(20 - U_0) \cdot \frac{U_0}{20}}{80 \cdot 10^{-3} \cdot 500 \cdot 10^3} \text{ , (H)} \quad (6)$$



Obr. 6 – závislost velikosti tlumivky na hodnotě výstupního napětí

Jak je vidět na obr. 6, pro zachování předem určených parametrů, tj. proudové zvlnětlumivkou $\Delta I_L = 80\text{mA}$ při vstupním napětí $U_{1\text{MAX}} = 20\text{V}$, musí být minimální hodnota indukčnosti $125\mu\text{H}$. Proto byla vybrána tlumivka $150\mu\text{H}$ od firmy EPCOS, řada B82464P4. Tato se vykazuje ekvivalentním sériovým odporem $\text{ESR} = 0,32\Omega$ a maximálním proudovým zatížením $I_{\text{MAX}} = 0,85\text{A}$, při rozměrech $10,4 \times 10,4 \times 4,8\text{mm}$. [14]

Návrh kondenzátoru:

$$C = \frac{\Delta I_L \cdot \frac{U_{0\text{MIN}}}{U_{1\text{MAX}}} \cdot T}{\Delta U - (\Delta I_L \cdot \text{ESR})} = \frac{80 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{7}{20} \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{30 \cdot 10^{-3} - (80 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3)} = 9,33 \cdot 10^{-6}\text{F} \quad (7)$$

Ze vztahu (7) je patrné, že při dodržení předem určeného zvlnětlumivky a zvlnětlumivky výstupního napětí $\Delta U = 30\text{mV}$ bude dostačovat hodnota kondenzátoru $10\mu\text{F}$.

Návrh diody:

$$I_D = \left(1 - \frac{U_{0\text{MIN}}}{U_{1\text{MAX}}}\right) \cdot I_{0\text{MAX}} = \left(1 - \frac{7}{20}\right) \cdot 0,85 = 0,55\text{A} \quad (8)$$

Z vypočteného proudu diodou a při závěrném napětí větším, než 15V byla zvolena schottkyho dioda MBRS130, která vydrží závěrné napětí až 30V a její maximální proud v propustném směru je 1A . [15]

3.2.2 Návrh měření nabíjecího proudu

Měření nabíjecího proudu bude provedeno stejně jako měření proudu do motorů, viz podkapitola 3.1.1. Následuje návrh měřicího rezistoru.

Známa fakta:

Maximální nabíjecí proud 0,7A, obvod AD8211 má zesílení 20, maximální měřitelné napětí je 3,3V.

Maximální použitelná hodnota odporu:

$$R_{\text{MAX}} = \frac{U_{\text{MAX}}}{\text{GAIN} \cdot I_{\text{MAX}}} = \frac{3,3}{20 \cdot 0,7} = 0,236\Omega \quad (9)$$

Kvůli dostupnosti a již předešlému použití u měření proudu do motorů bude použit rezistor hodnoty 0,1Ω velikosti 1206.

Maximální výkonové zatížení:

$$P_{\text{MAX}} = I_{\text{MAX}}^2 \cdot R = 0,7^2 \cdot 0,1 = 49\text{mW} \quad (10)$$

Výstupní napětí při 0,7A:

$$U_O = \text{GAIN} \cdot I_{\text{MAX}} \cdot R = 20 \cdot 0,7 \cdot 0,1 = 1,4\text{V} \quad (11)$$

3.3 Systém pro návrh schémat a plošných spojů Formica

Pro vytvoření schématu a desky plošného spoje bude využito tuzemského systému Formica, který díky své příznivé ceně využívá jak spousta malých soukromých firem, tak velké nadnárodní společnosti, působící např. v automobilovém průmyslu, oblastech spotřební elektroniky, telekomunikací, zabezpečovací techniky apod. Rovněž se systému využívá na středních školách pro výuku.

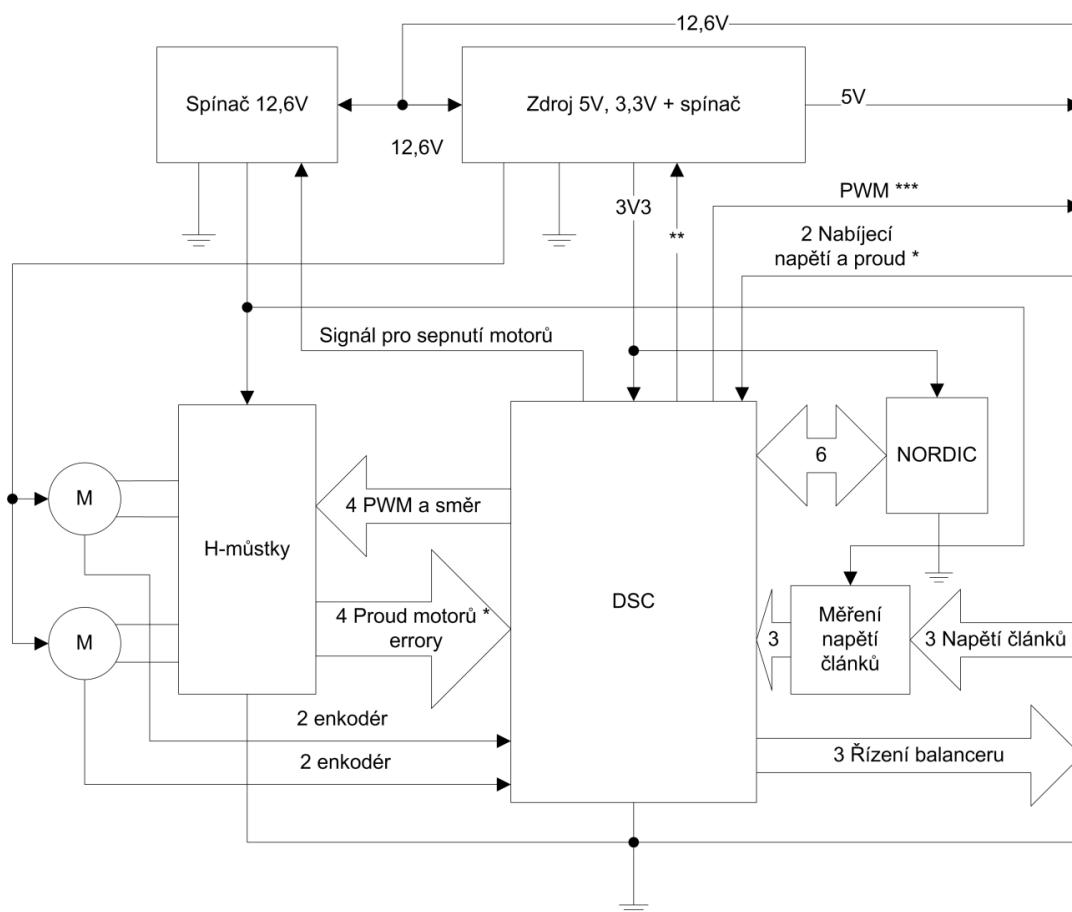
Hlavní výhodou celého systému je absence knihovních souborů. Ty jsou nahrazeny přímo soubory schémat a desek. Tedy jakýkoliv vytvořený soubor se chová jako knihovna a lze z něj vybrat v něm použité (či uživatelem nakreslené) prvky do jiného souboru. Další výhodou je možnost použití klávesnice pro pohyb v menu a to ve formě jednoho písmena pro položku, což značně zrychluje celou práci. [16]

4 Realizace

Fotbalový robot se bude skládat ze dvou hlavních částí, a to řídicí části a nabíjecí části. Tyto budou probírány postupně.

4.1 Řídicí část

Blokové schéma řídicí části se nachází na obr. 7. Pro řízení robota je použit DSC firmy Freescale, který pomocí dvou PWM a dvou digitálních signálů řídí směr a rychlost otáčení motorů přes H-můstky, z motorů snímá otáčky pomocí optických rotačních enkodérů, integrovaných v motorech.



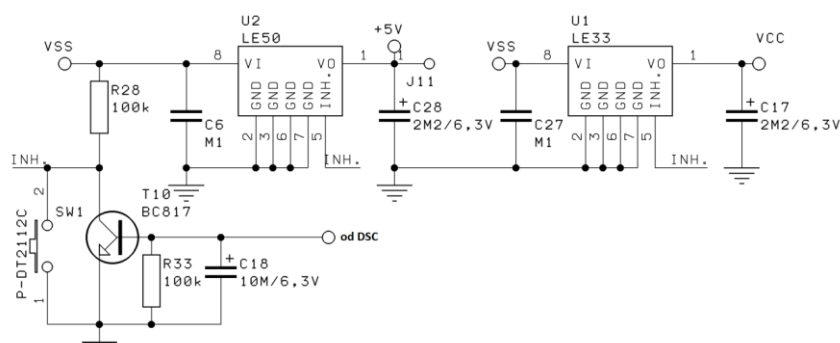
* napěťový údaj 0 ~ 3,3V

** signál pro držení sepnutého napájení

*** PWM signál pro řízení nabíjecího obvodu

Obr. 7 – blokové schéma realizace řídicí části

Pro napájení kontroléru a ostatních periférií jsou použity lineární stabilizátory LE33 a LE50, které obsahují vstup INHIBIT, kterým se dají vypnout. Tyto vypínací vstupy jsou spojeny a vyvedeny jak na spínací tlačítko, tak na spínací tranzistor, řízený DSC, viz obr. 8. Ovládání napájení je následující. Uživatel stiskne spínací tlačítko a to na dobu potřebnou k náběhu napětí a rozběhnutí programu v DSC, který pak svým výstupem sepne tranzistor a uživatel může tlačítko uvolnit. Kondenzátor a rezistor v obvodu báze tranzistoru zajišťují přidržení napájení při resetu kontroléru, kdy jeho výstupní pin přejde do stavu vysoké impedance.

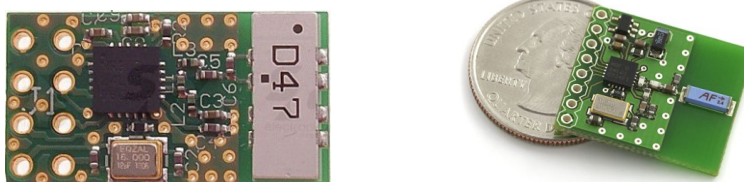


Obr. 8 – schéma zapojení napájení

Napájení motorů a měřičů napětí článků jsou přivedena přímo z baterie přes elektronický spínač v podobě výkonového P-kanálového tranzistoru typu MOSFET. Ten je řízen rovněž z DSC a umožňuje celému robotu přejít do režimu se sníženou spotřebou a jeho celkové vypnutí.

Pro řízení motorů jsou použity 5A H-můstky TLE 5206-2 firmy Infineon technologies. Tyto jsou schopny dodat špičkově až 6A při napájecím napětí až 40V. Jejich výhodami jsou teplotní a protizkratové pojistky, CMOS/TTL kompatibilní vstupy, integrované zpětné diody a především vyšší frekvence řídicího PWM signálu. [19]

Robot komunikuje s řídicím systémem bezdrátově pomocí čipu firmy NORDIC, konkrétně nRF24L01. V této práci je použito dvou modulů obsahujících tento čip, komunikující po sériovém kanálu SPI. První je DCBT-24N firmy DECIBIT, druhým je modul firmy SPARKFUN, viz následující obrázek. [20], [21]

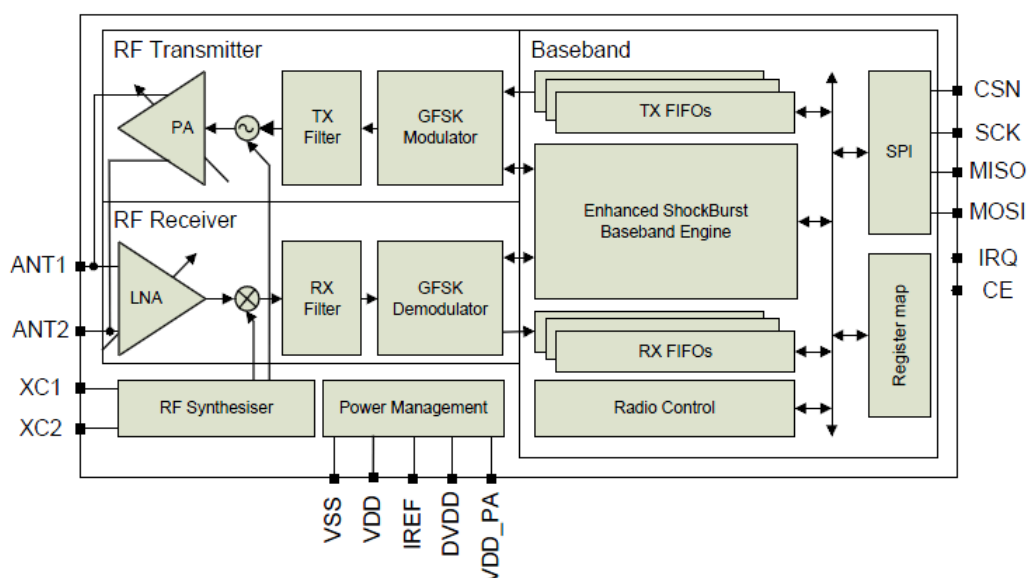


Obr. 9 – moduly DCBT-24N (vlevo) a SPARKFUN(vpravo) [20], [21]

4.2 Popis čipu nRF24L01

Tento čip firmy NORDIC se specializuje na bezdrátovou komunikaci v pásmu 2,4GHz a kombinuje vysílací i přijímací část. Rychlost přenosu je až 2Mbps a vyznačuje se nízkou spotřebou 11,3mA vysílací části a 12,3mA přijímací části při rychlosti dat 2Mbps. Obsahuje vlastní napěťový regulátor, jeho vstupní napájecí napětí se může pohybovat mezi 1,9V až 3,6V. Disponuje vylepšený „ShockBurst“, což je datová vrstva na bázi paketu, která automaticky skládá pakety, stará se o časování, automatické potvrzení a znovu odeslání paketů.

Rádiový systém využívá GFSK modulaci a lze nastavit parametry přenosu, jako jsou frekvenční kanál, výstupní výkon či rychlost přenosu dat.



Obr. 10 – blokový diagram čipu nRF24L01 [22]

K čipu se připojuje pouze externí 16MHz krystal, anténní obvod a několik pasivních součástek pro zajištění správného chodu. Čip slouží pouze ke zprostředkování komunikace, tedy převodu datového signálu na bezdrátovou formu a naopak. K jeho řízení je třeba jakýkoliv mikrokontrolér, disponující sériovým rozhraním SPI. [22]

4.3 Požadavky pro výběr digitálního signálního kontroléru

Vzhledem k tomu, že konstrukce robota má malé rozměry, bylo použítí původního digitálního signálního kontroléru 56F805 přítěží. Tento má 160 pinů, z čehož je velká většina v robotu nevyužita. Bylo proto nutno najít menší kontrolér, který by vyhovoval následujícím požadavkům, které vycházejí z návrhu robota.

- 11 vstupně výstupních pinů
- Modul pulsní šířkové modulace s alespoň šesti výstupy
- Analogově digitální převodník s minimálně osmi vstupy
- Modul sériové komunikace SPI
- 2 kvadrurní dekodéry s integrovaným filtrem
- Minimálně 2 čítače/časovače (vychází z původního firmware)
- Programovací a ladící rozhraní JTAG
- Co nejmenší rozměry

Všechny výše zmíněné požadavky splňuje mikrokontrolér 56F8037, který je oproti původnímu novější a značně menší. V následující kapitole se nachází jeho popis.

4.4 Popis mikrokontroleru 56F8037

Rodina 56F803X je založena na jádru digitálních signálových mikrokontrolérů 56800E, která na jednom čipu kombinuje výpočetní výkon digitálního signálového procesoru s funkcemi běžných mikrokontrolérů s flexibilní sadou periferií. Tyto jsou obzvláště užitečné pro aplikace průmyslového řízení, řízení pohybu, domácích spotřebičů, invertorů pro široké použití, chytrých senzorů, zabezpečovacích a protipožárních systémů, spínaných zdrojů, správy napájení a lékařských monitorovacích systémů.

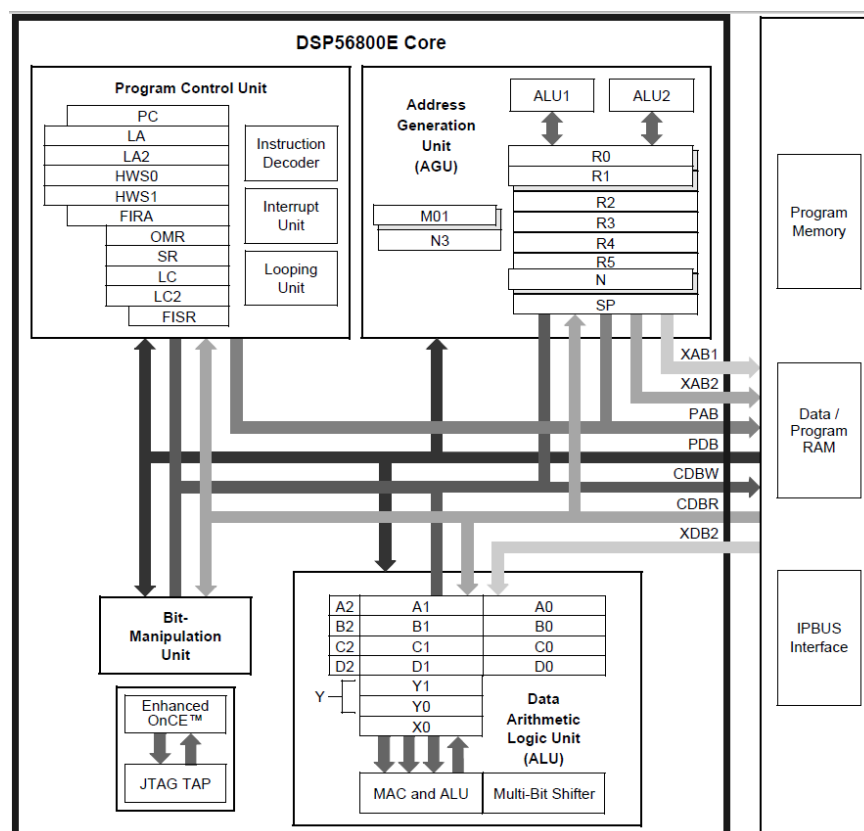
Jádro 56800E je založeno na duální Harvardské architektuře, která obsahuje tři paralelně pracující výkonné jednotky, což umožňuje až šest operací v jednom cyklu. Optimalizovaný instrukční soubor, který je velmi efektivní pro kompilátory jazyka C, dovoluje přímo generaci efektivního řídicího kódu. [17]

DSC disponuje následujícími periferiemi.

- 64KB programové paměti typu Flash
- 8KB spojené programové a datové paměti typu RAM
- Jeden šesti-kanálový modul pro generování pulsní šířkové modulace
- Dva osmi-kanálové 12 bitové analogově digitální převodníky
- Dva 12 bitové digitálně analogové převodníky
- Dva analogové komparátory
- Tři časovače s programovatelným intervalem

- Dvě sériové komunikační rozhraní s frontou
- Dvě sériové periferní rozhraní s frontou
- Dva 16 bitové čtyřnásobné časovače
- Port pro interní integrovaný obvod
- Watchdog a obvod pro hlídání správného chodu počítače
- Relaxační oscilátor
- Integrovaný reset při zapnutí a modul přerušení při nízkém napětí
- JTAG/EOnCE pro nenásilné ladění v reálném čase [18]

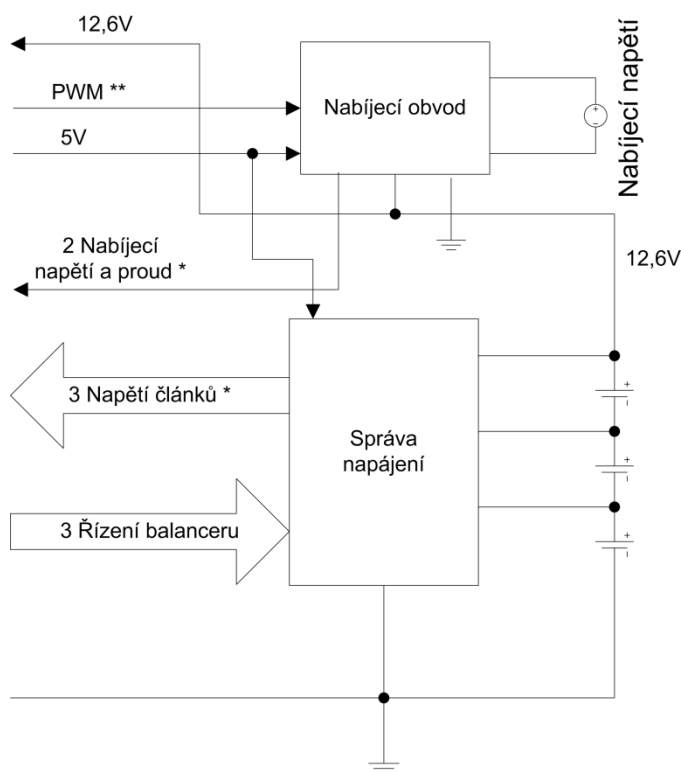
Jádro digitálního signálového kontroléru je schopno vykonat až 32 milionů instrukcí za sekundu při frekvenci jádra 32MHz. Obsahuje jednocyklový 16 bitový paralelní akumulátor, čtyři 36 bitové akumulátory, tři interní adresové a čtyři interní datové sběrnice. [18]



Obr. 11 – blokové schéma jádra mikrokontroléru [18]

4.5 Nabíjecí část

Do této části se připojuje baterie, k řídící části jsou vedeny pouze silové napájecí vodiče baterie přes konektor. Funkci nabíjecího obvodu zastává akumulární měnič se snižujícím napětím, tzv. step-down, který je z kontroléru řízen PWM. Zpětnou vazbou je měřený nabíjecí proud a vstupní nabíjecí napětí. To je měřeno za účelem odstranění chyby uživatele.



* napěťový údaj

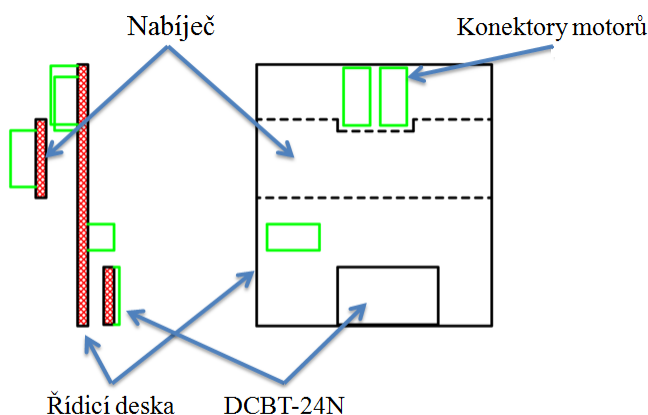
**** PWM řízení nabíjecího obvodu**

Obr. 12 – blokové schéma realizace nabíjecí části

Baterie je připojena k správně napájení. Ta obsahuje obvody pro balancování napětí a spínače k měřicímu obvodu. Řízení balancerů zajišťuje kontrolér pomocí PWM. Napětí z článků je vedeno k řídicí části na vstupy rozdílových zesilovačů.

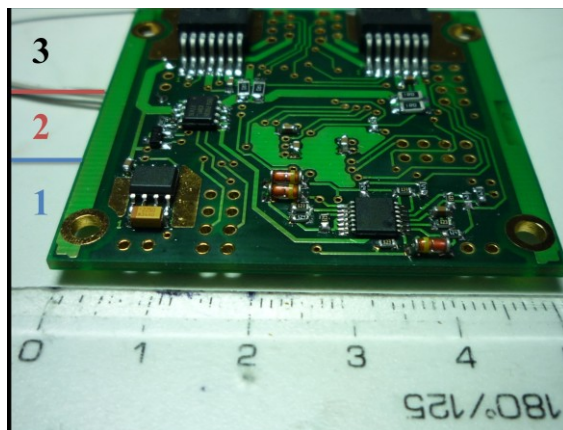
4.6 Návrh desky plošného spoje

Řídicí deska byla navržena tak, aby ji bylo možno umístit do stávajících robotů o rozměrech 52,5 x 50 mm, ale i do zamýšlené konstrukce o rozměrech 45 x 50 mm. Do této desky se připojuje nabíjecí část, která je navržena tak, aby bylo dosaženo snadné manipulace s konektory motorů, a umísťuje se do spodní části desky z důvodu připojení baterie přímo k nabíjecí desce. Bezdrátový modul je připevněn z vrchní strany řídicí desky. Konektor je navržen pro modul DCBT-24N, modul firmy SPARKFUN musí být připevněn na vodiče.



Obr. 13 – rozmístění desek

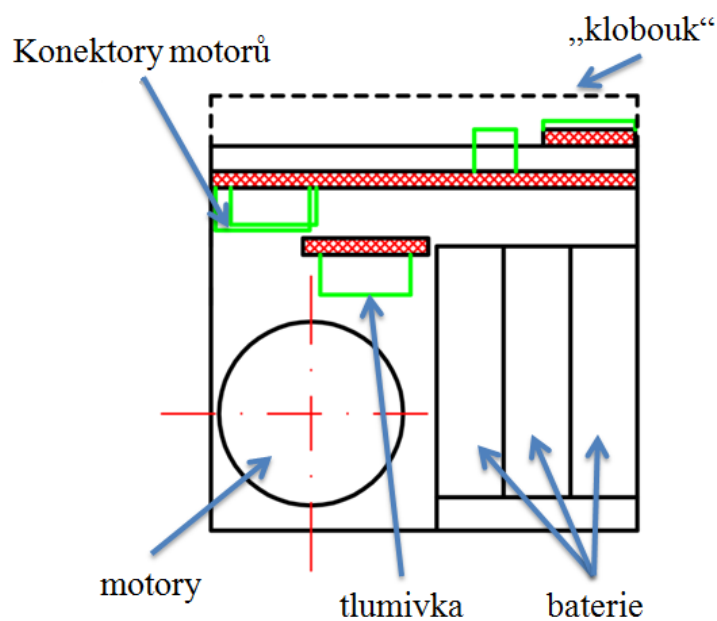
Řídicí deska je rozdělena do tří zón z hlediska rušení (viz obr. 14), a to na klidovou zónu (na obr. označenou jako 1), obsahující veškeré analogové signály a bezdrátovou komunikaci, na zónu rychlé změny proudu (na obr. označenou jako 2), ve které se nachází procesor a veškeré signály PWM, a na výkonovou zónu (na obr. označenou jako 3), obsahující H-můstky a konektory k motorům.



Obr. 14 – rozdělení desky na zóny

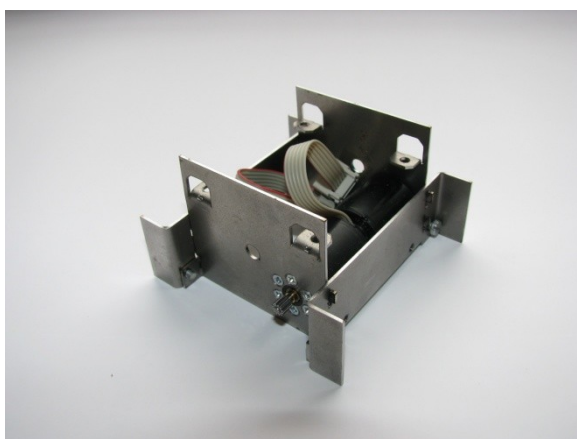
4.7 Umístění do robota

Na obr. 15 se nachází náčrtek robota z bočního pohledu a umístění desek. Řídicí deska musí být oproti původní konstrukci umístěna nad baterie, a to z důvodu umístění nabíjecí části u motorů.



Obr. 15 – umístění desky do robota

Jak je patrné z následujícího obr. 16, konstrukce robota a umístění motorů neumožňuje umístění řídicí desky tak, jak bylo původně zamýšleno. Nabíjecí deska je příliš vzdálena od řídicí desky a je na ní umístěna tlumivka o výšce 4,8mm.



Obr. 16 – ukázka konstrukce robota

5 Firmware

Firmware robota je napsán ve vývojovém prostředí „Freescale Code Warrior for DSC 56800E“ s pomocí utility „Processor Expert“ pro zjednodušení celého programování.

5.1 Processor Expert

Tato utilita je integrována přímo do vývojového prostředí pro mikrokontroléry Freescale. Umožňuje programátoru zabývat se pouze řídicím algoritmem bez nutnosti studovat datasheet použitého kontroléru, popřípadě nutnosti editovat nějaký již hotový projekt.

Processor Expert dovoluje vcelku snadno nastavit jak systémové registry jádra a jednotlivých periférií, tak vstupů i výstupů za použitím grafického uživatelského prostředí a následně vygenerovat inicializační kód v jazyku C. Generovány jsou i metody pro použití či programové nastavení periférií, jejichž voláním lze nastavit nebo přecházet hodnoty vstupu či výstupu, zahájit převod A/D převodníku, spustit časování, vyslat nebo přijmout data ze sériového rozhraní apod. Práce s ním je pro technika znalého obecné struktury mikrokontrolérů a jejich názvosloví velmi snadná a rychlá.

Výsledný vygenerovaný kód je velice přehledně strukturovaný včetně komentovaného popisu všech metod a částí kódu. Do takto vygenerovaného kódu lze ihned přidat vlastní algoritmus a ihned projekt přeložit a nahrát do mikrokontroleru. [23]

5.2 Popis firmware

Kód je složen ze tří hlavních částí, a to komunikace s nadřazeným systémem, PSD regulace motorů a nabíjení baterií. První dvě části byly převzaty z původního řídicího systému a upraveny pro nový procesor a způsob programování, tedy použití výše zmíněného Procesor Expertu.

5.2.1 Komunikace s nadřazeným systémem

Vzhledem k použití čipu firmy Nordic je komunikace napsána dle popisu uvedeného v datasheetu pro tento obvod. Rychlost komunikace je nastavena na 2 Mbps. Komunikace s modulem po sériovém rozhraní SPI zajišťuje periferie DSC, přičemž není použito generovaných metod Procesor Expertu, ale přímý zápis a čtení z registrů periferie. V komunikační metodě se nejprve odešlou data a posléze jsou v softwarové smyčce očekávána příchozí data z modulu.

5.2.2 Regulace motorů

Regulace je řízena časovačem, jehož přerušení má největší prioritu ze všech použitých. Dále je celá operace zpracována ihned v rámci přerušení na rozdíl od komunikace. Tím je zajištěn požadavek na co nejvíce konstantní periodu vzorkování.

Algoritmus regulace má tyto režimy:

- Klidový stav – neprobíhá regulace pohonu. Výchozí stav či při vybití baterie.
- Regulace.
- Přímé nastavení PWM na pohony kol nadřazeným systémem.
- Šetření energie.

Při regulování jsou měřeny proudy do motorů a jejich průměrování plovoucím filtrem z důvodu zvlnění proudu díky PWM řízení motoru. Pokud je překročena limitní hodnota proudu, je následně upravena velikost požadované hodnoty otáček motoru, aby nedošlo k jeho zničení. Následuje vlastní výpočet regulační odchylky a akčního zásahu pomocí lichoběžníkové metody pro výpočet integrálu.

Parametry regulace jde měnit z nadřazeného systému, pevně v robotu jsou nastaveny takto: $P = 5$, $D = 0,01$, $I = 20$.

5.2.3 Nabíjecí systém

Nabíjení baterií je řešeno v přerušení časovače, které nastává každou 1 ms a má nejnižší prioritu ze všech přerušení, a to z důvodu regulace motorů, které vyžadují co nejpřesnější dodržení vzorkovací periody. Při nabíjení je ovšem celá regulace vypnuta, poněvadž robot musí stát na místě, aby nedošlo k vytržení kabeláže od zdroje nabíjecího napětí.

Tato část kódu využívá následující periferie procesoru. Jeden kanál PWM časovače pro řízení nabíjecího obvodu, 3 piny pro balancování článků, výše zmíněný časovač pro chod nabíjení a A/D převodník pro měření vstupního nabíjecího napětí, nabíjecího proudu a napětí jednotlivých článků. Převodník je v „Procesor Expertu“ nastaven tak, aby byla rychlost převodu co největší (1.594 μ s). Dále se provede 8 měření za sebou a je spočten průměr.

Proces nabíjení je navržen dle metody CCCV. Při události přerušení časovače je nejprve změřeno vstupní nabíjecí napětí. Pokud se jeho hodnota pohybuje v daných mezích, konkrétně 13V až 20V, začne proces nabíjení, kdy je povolen PWM signál do nabíjecího obvodu a zakázán do všech ostatních obvodů (balancery a motory). Dále je změněna hodnota PWM čítače pro nastavení správné frekvence 500kHz a je volán chod samotného nabíjení. Klesne-li hodnota vstupního napětí pod 13V, je nabíjení ihned ukončeno.

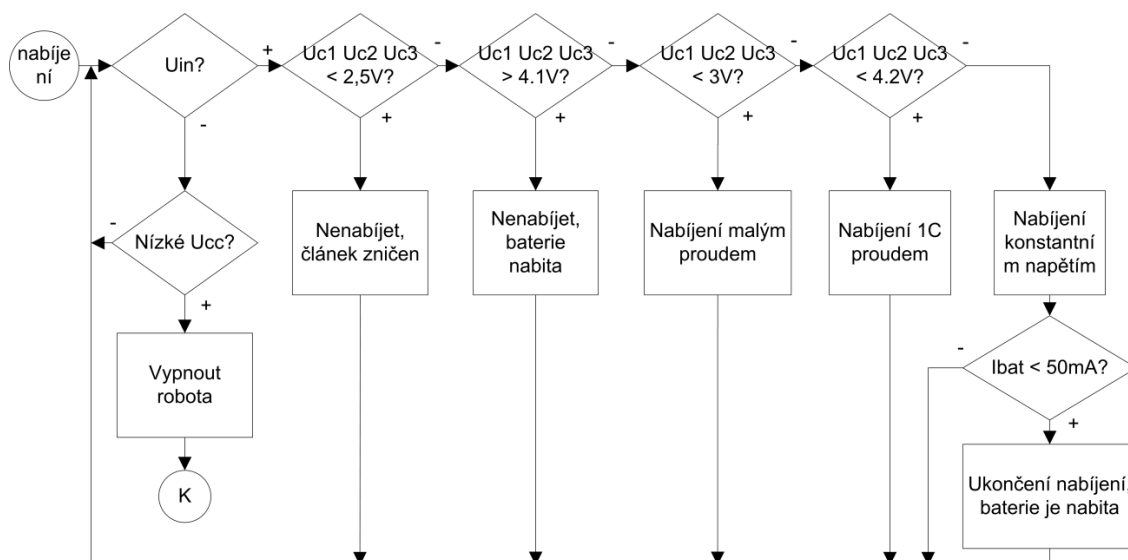
V samotném procesu nabíjení se nejprve provede změření napětí všech článků a velikosti nabíjecího proudu. Dle napětí článků je poté určen způsob nabíjení. Je-li napětí alespoň jednoho článku:

- nižší, než 2,5V, dojde k upozornění uživatele na chybu a samotné nabíjení nezačne
- vyšší, než 4,1V, baterie jsou považovány jako nabité a není nutno je nabíjet
- nižší, než 3V, začne se provádět pomalé nabíjení nízkým proudem cca 100mA
- nižší, než 4,2V, začne se provádět standardní nabíjení proudem 750mA
- rovno 4,2V, začne se provádět dobíjení konstantním napětím.

Pro dodržení konstantního proudu či napětí je výstup nabíjecího obvodu regulován přírůstkovým regulátorem, který porovná měřenou veličinu s požadovanou, a podle výsledku buďto přidá či ubere na hodnotě činitele plnění PWM.

Nabíjení je ukončeno, pokud nabíjecí proud klesne pod hodnotu 50mA, a již na naměřené hodnoty A/D převodníkem není brán ohled, dokud není odpojeno vstupní nabíjecí napětí.

V průběhu celého nabíjení (mimo nabíjení malým proudem) jsou každých 50ms mezi sebou porovnávány napětí článků. Pokud je alespoň jedno napětí článku různé od ostatních o 50mV, započne balancování článků. Zde je vyhodnoceno, který z článků má nejnižší hodnotu napětí, a který z ostatních článků má hodnotu vyšší, pokud ne oba. Poté je spuštěno vybíjení příslušného článku po dobu 50ms. Po uplynutí této doby je znovu zkontrolována difference napětí mezi články a celý proces se opakuje. Celý algoritmus nabíjení je uveden na následujícím zjednodušeném vývojovém diagramu. Kompletní vývojový diagram se nachází v příloze.



Obr. 17 – zjednodušený vývojový diagram nabíjení

6 Testování

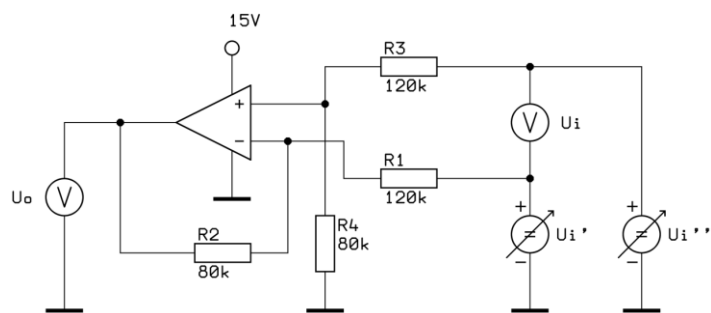
Tato kapitola se zabývá testováním a měřením všech částí robota. Jako první je testován hardware robota, konkrétně měření na všech měřicích obvodech a nabíjecím obvodu. Následuje testování řídicího systému. Nakonec je testován nabíjecí systém.

6.1 Hardware robota

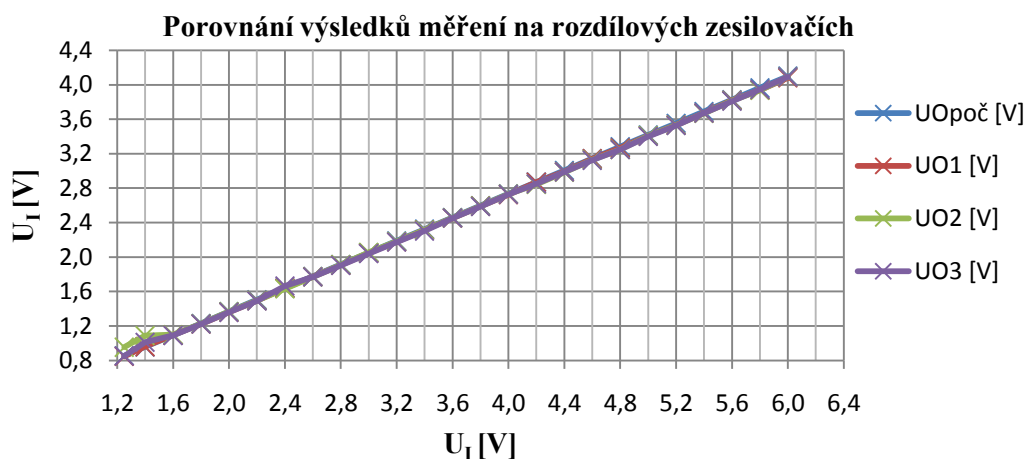
Zde bylo provedeno měření rozdílových zesilovačů k ověření jejich správné funkce a z důvodu kalibrace. Ze stejných důvodů bylo následně provedeno i měření na obvodu AD8211 na nabíjecí části.

6.1.1 Měření rozdílových zesilovačů

Na následujícím obrázku se nachází schéma zapojení jediného rozdílového zesilovače, byť jsou v robotu použity tři. Měření bude provedeno vždy pouze na jednom z nich.



Obr. 18 – zapojení diferenčního zesilovače pro měření

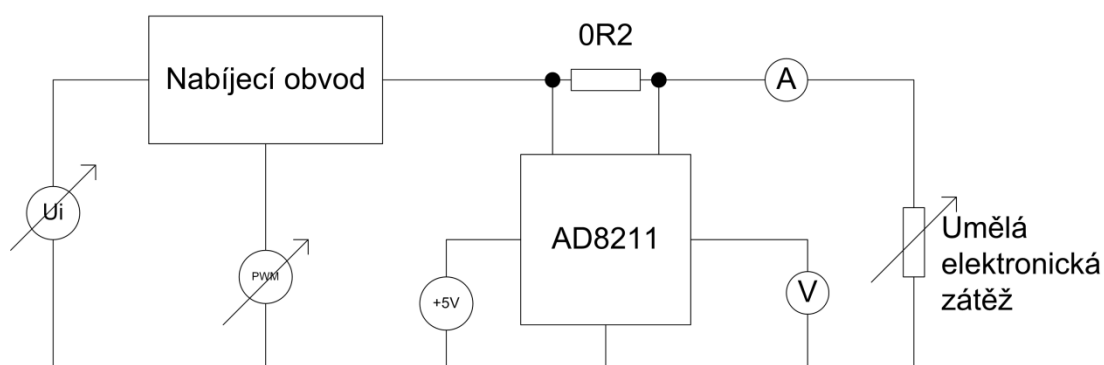


Obr. 19 – porovnání výsledků měření na rozdílových zesilovačích

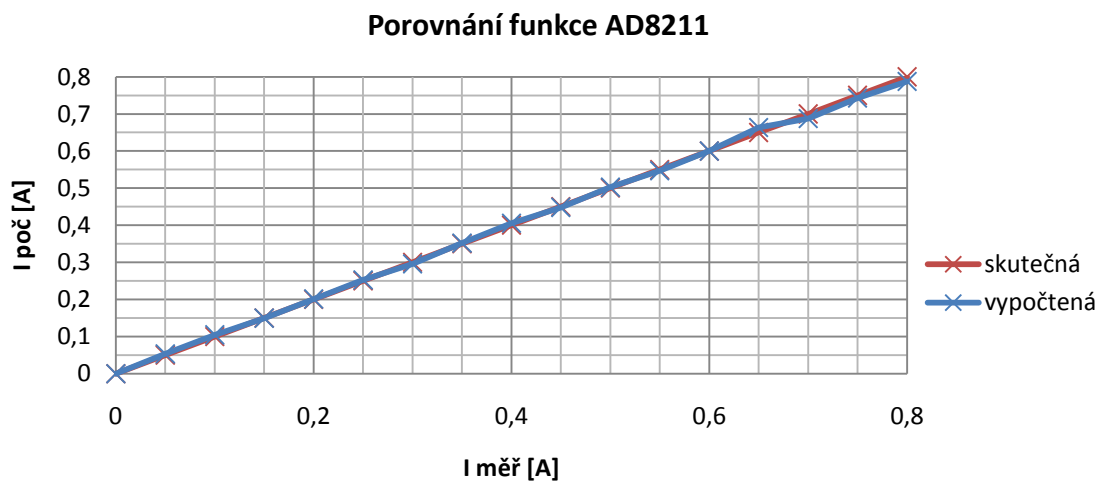
Jak je patrné z grafu na obr. 19, změřená výstupní napětí jednotlivých rozdílových zesilovačů se příliš neliší od vypočtené hodnoty. Korekce v algoritmu robota tedy nebude potřeba, čímž se algoritmus značně zjednoduší.

6.1.2 Měření AD8211

Dále bylo provedeno měření na AD8211, tedy na převodníku proudu na napětí v nabíjecí části. Namísto baterie byla připojena umělá elektronická zátěž k nastavení výstupního proudu.



Obr. 20 – blokové schéma měření na AD8211



Obr. 21 – porovnání výsledků měření na AD8211

Jak je vidět na předešlém grafu, obě křivky, tedy skutečný výstupní proud a proud vypočtený z měřeného napětí na výstupu AD8211 jsou téměř stejné. Menší nepřesnost lze vidět od 650mA výš. To je ovšem stále v toleranci

6.2 Řídicí systém

Testování komunikace proběhlo úspěšně. Bylo ovšem nutno vyměnit původní komunikační modul DCBT-24N, a to z důvodu jeho poškození při demontáži. Ten byl nahrazen modulem firmy SPARKFUN, který byl snadněji k sehnání.

Tato práce se nezabývá návrhem nového regulátoru pro kola robotu. Algoritmus celé regulace byl pouze přepsán pro nový procesor a byla odzkoušena jeho činnost. Regulace jako taková je špatná, a to z důvodu použití jiných H-můstků, vyšší řídicí frekvence a vyššího napájecího napětí.

6.3 Nabíjecí systém

Tlumivka nabíjecího zdroje má při provozu poměrně vysokou teplotu, proto je při umísťování desek do konstrukce nutné dbát na to, aby se kabely motorů tlumivky nedotýkaly.

Nabíjení baterií bylo testováno na tříčlánkové baterii, která byla složena ze dvou dvoučlánkových (viz následující obrázek). Baterie je zde ještě bez ochranného obalu a to z důvodu snadného přístupu k elektrodám článků a tedy ke snadnému měření jejich napětí. Původní baterie byly čínské výroby, typ IB1052245P6H s kapacitou 1000mAh. Články jsou k sobě připevněny tak, aby se co nejlépe vešly do konstrukce robota.



Obr. 22 – baterie použitá k testování nabíjení

Nabíjení probíhá velmi dobře. Nebylo testováno nabíjení malým proudem při značně vybitých bateriích, protože předem nebylo známo, jestli tyto baterie tak značné vybití vydrží bez poškození. Při nabíjení standardním konstantním proudem se nabíjecí proud pohybuje v rozmezí 690mA až 730mA, což se dá považovat za dobrý výsledek. Při nabíjení konstantním napětím se toto udržuje dle nejvíce nabitého článku a pohybuje se v rozmezí přibližně 50mV. Uvedená rozmezí pravděpodobně zapříčiňuje nepřesné měření napětí a proudu systémem, který tak špatně reguluje výstup. Nabíjení baterie bylo ukončeno přibližně při 100mA. Následuje tabulka nabití článků.

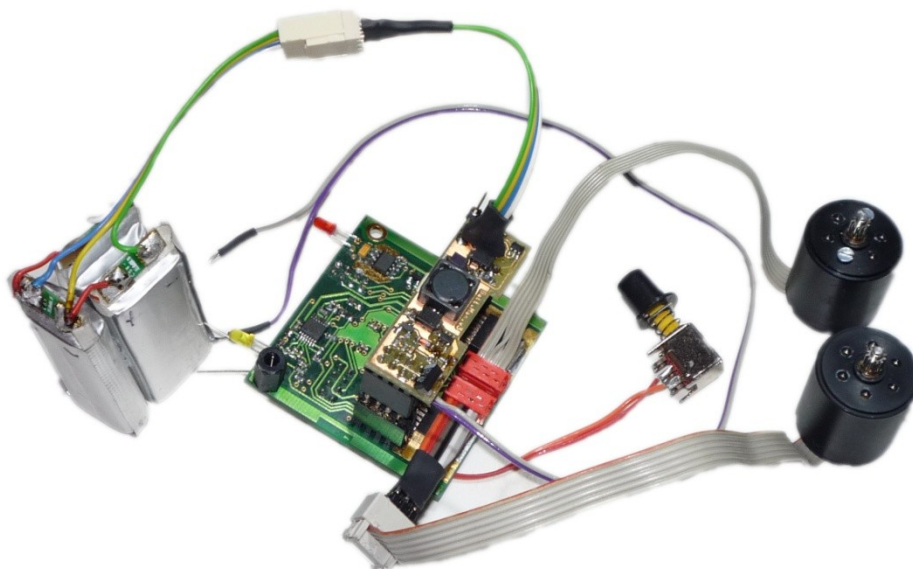
První článek (vrchní)	Druhý článek	Třetí článek (spodní)
4,17V	4,17V	4,20V

Tab. 1 – napětí jednotlivých článků po nabití

Jak je z tabulky vidět, třetí článek, umístěný ve spodu baterie, je nabitý úplně: Ostatní články ovšem nabity do plné kapacity nejsou. Příčinou je nedokonalá funkce balanceru, konkrétně nízká hodnota vybíjecího proudu jednotlivých článků.

6.4 Shrnutí testování

Testování celého systému bylo prováděno na nesmontovaném robotu, a to z důvodu snadné manipulace a přístupu k měřicím bodům na desce (viz následující obrázek).



Obr. 23 – fotografie řídicího systému

Měření v systému probíhá korektně a není třeba je kalibrovat. Je třeba pouze aplikovat jednoduchou filtraci ve formě plovoucího průměru. Robot reaguje na příkazy z vysílačky na správnou vzdálenost. Algoritmus regulace běží, jen je zapotřebí návrh nových konstant regulátoru kvůli výše uvedeným důvodům.

7 Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout nový řídicí systém pro aplikaci fotbalových robotů, vybrat nejlepší typ akumulátoru a navrhnout integrovaný nabíjecí systém. Dále upravit firmware původního řídicího systému pro nový systém a přidat nabíjecí algoritmus. Nakonec celý systém otestovat na funkčnost.

Splnil jsem všechny body zadání práce. Vybral jsem vhodný akumulátor, konkrétně lithium-polymerový (Li-Pol), a to kvůli malým a hlavně specifickým rozměrům článků, které bývají ploché. Tento jsem rovněž vybral díky poměrně snadnému nabíjení metodou CCCV a integraci tohoto nabíjení do systému včetně balancování článků při použité tříčlánkové baterii.

Dále jsem navrhnul řídicí systém s ohledem na modularitu. Lze tedy snadno vyměnit modul pro komunikaci při jeho poruše nebo úplné změně typu komunikace. Musí být dodržena pouze sériová sběrnice pro komunikaci modulu s digitálním signálovým kontrolérem. Dále je možno vyměnit celý modul pro nabíjení baterií.

V návrhovém systému Formica jsem navrhnul schéma zapojení a desky řídicí i nabíjecí části tak, aby se tyto vešly do konstrukce robota stávajícího, i do zamýšlených konstrukcí, z jejichž nákupu nakonec v průběhu práce sešlo. Vybral jsem vhodný kontrolér, konkrétně 56F8037 firmy Freescale Semiconductor, a to především kvůli malým rozměrům.

Upravil jsem stávající firmware tak, aby fungoval v novém řídicím systému a přidal vlastní algoritmus nabíjení, jehož kompletní vývojový diagram se nachází v příloze č. VI.

Při testování nabíjení jsem zjistil, že je nutno balancovat články po celou dobu nabíjení. První návrh, kdy se balancery řídí PWM signálem tedy není proveditelný, protože DSC je schopno generovat PWM pouze o jedné frekvenci. Nynější systém tedy balancery pouze spíná a vybíjí tak články naplno. Nabíjení je funkční a probíhá bezproblémově. Balancování není úplně ideální, články po nabití nemají stejná napětí, liší se o několik desítek mV. Tento problém by bylo vhodné do budoucna vyřešit.

8 Použitá literatura

- [1] *Wikipedia : The Free Encyclopedia* [online]. 14.1.2011 [cit. 2011-01-15]. Akumulátor. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Akumulátor>>.
- [2] *Wikipedia : The Free Encyclopedia* [online]. 30.11.2010 [cit. 2011-01-15]. Olověný akumulátor. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Olověný_akumulátor>.
- [3] *Wikipedia : The Free Encyclopedia* [online]. 1.10.2010 [cit. 2011-01-16]. Nikl-kadmiový akumulátor. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Nikl-kadmiový_akumulátor>.
- [4] *Wikipedia : The Free Encyclopedia* [online]. 1.10.2010 [cit. 2011-01-16]. Nikl-metal hydridový akumulátor. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Nikl-metal_hydridový_akumulátor>.
- [5] *Wikipedia : The Free Encyclopedia* [online]. 20.10.2010 [cit. 2011-01-16]. Lithium-iontový akumulátor. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-iontový_akumulátor>.
- [6] *Wikipedia : The Free Encyclopedia* [online]. 20.6.2010 [cit. 2011-01-16]. Lithium-železo-fosfátový akumulátor. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-železo-fosfátový_akumulátor>.
- [7] *Modell-shop.cz* [online]. 2007 [cit. 2011-01-16]. Li-pol - zásady používání. Dostupné z WWW: <<http://www.modell-shop.cz/stranka/Li-pol---zasady-pouz/7>>.
- [8] *Wikipedia : The Free Encyclopedia* [online]. 12.1.2011 [cit. 2011-01-16]. Lithium-ion polymer battery. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_polymer_battery>.
- [9] *EETimes Europe Power Management* [online]. 14.10.2009 [cit. 2011-04-27]. Increasing Large Li-Ion Battery Pack Energy Delivery with Active Cell Balancing. Dostupné z WWW: <http://www.powermanagement-europe.com/en/increasing_large_li-ion_battery_pack_energy_delivery_with_active_cell_balancing?cmp_id=7&news_id=220600796>.
- [10] *Rchelicopterfun.com* [online]. 2010 [cit. 2011-04-26]. Understanding RC LiPo Batteries. Dostupné z WWW: <<http://www.rchelicopterfun.com/rc-lipo-batteries.html>>.
- [11] *Freescale* [online]. 1. 10. 2008 [cit. 2011-01-15]. Datasheet MC33887. Dostupné z WWW: <http://www.freescale.com/files/analog/doc/data_sheet/MC33887.pdf>.

- [12] *Analog Devices* [online]. 2007 [cit. 2011-01-15]. Datasheet AD8211. Dostupné z WWW: <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8211.pdf>.
- [13] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje : teorie, příklady návrhu, měření*. vydání 1. Praha : BEN - technická literatura, 2002. 240 s. ISBN 80-86056-91-0.
- [14] *EPCOS* [online]. 1. 5. 2009 [cit. 2011-01-16]. Datasheet B82464P4. Dostupné z WWW: <http://www.epcos.com/inf/30/db/ind_2008/b82464p4.pdf>.
- [15] *Fairchild Semiconductors* [online]. 2004 [cit. 2011-01-15]. Datasheet k MBRS130. Dostupné z WWW: <<http://www.fairchildsemi.com/ds/MB/MBRS130.pdf>>.
- [16] HORSKÝ, Petr. *Formica 4.2 : návrhový systém pro plošné spoje : editor plošného spoje a autorouter : příručka uživatele*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 1998. 190 s. ISBN 80-86056-34-1.
- [17] *Freescale semiconductor* [online]. 2010 [cit. 2011-04-20]. 56F803X: Digital Signal Controller with CAN. Dostupné z WWW: <http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=56F803X>.
- [18] *Freescale semiconductor* [online]. 2010 [cit. 2011-04-20]. Datasheet k 56F8037. Dostupné z WWW: <http://cache.freescale.com/files/dsp/doc/data_sheet/MC56F8037.pdf?fp=1>.
- [19] *Infineon technologies* [online]. 31. 7. 2007 [cit. 2011-01-16]. Datasheet TLE 5206-2. Dostupné z WWW: <[http://www.infineon.com/dgdl/TLE5206-2_DS_11\[1\].pdf](http://www.infineon.com/dgdl/TLE5206-2_DS_11[1].pdf)>.
- [20] *Decibit* [online]. 2008 [cit. 2011-01-16]. Datasheet k DCBT-24N. Dostupné z WWW: <<http://www.decibit.com/dcbt-24.pdf>>.
- [21] *Sparkfun Electronic* [online]. 2008 [cit. 2011-04-20]. Transceiver nRF24L01+ Module with Chip Antenna. Dostupné z WWW: <<http://www.sparkfun.com/products/691>>.
- [22] *Nordic Semiconductor* [online]. 2007 [cit. 2011-04-18]. Datasheet k nRF24L01. Dostupné z WWW: <http://www.nordicsemi.com/eng/content/download/2730/34105/file/nRF24L01_Product_Specification_v2_0.pdf>.
- [23] VOJÁČEK, Antonín. *Hw.cz* [online]. 25.3.2008 [cit. 2011-04-18]. Processor Expert - snadné nastavení MCU a periférií jen klikáním myši. Dostupné z WWW: <<http://hw.cz/teorie-praxe/programovani/art2269-processor-expert-snadne-nastaveni-mcu-periferii-jen-klikanim-mysi>>.

9 Seznam příloh

PŘÍLOHA Č. I	Seznam součástek
PŘÍLOHA Č. II	DPS řídicí části
PŘÍLOHA Č. III	DPS nabíjecí části
PŘÍLOHA Č. IV	Tabulka měření rozdílových zesilovačů
PŘÍLOHA Č. V	Tabulka měření AD8211
PŘÍLOHA Č. VI	Vývojový diagram nabíjení
PŘÍLOHA Č. VII	Fotografie systému
PŘÍLOHA Č. VIII	Schéma zapojení